

## Litar Penuai Tenaga Hibrid Mikro untuk Aplikasi Bioperubatan

(Micro Hybrid Energy Harvester Circuit for Biomedical Application)

Jahariah Sampe\*, Nor Afidatul Asni Semsudin, Farah Fatin Zulkifli & Burhanuddin Yeop Majlis

### ABSTRAK

*Penggunaan penuai tenaga sebagai bekalan kuasa mendapat perhatian tinggi terutamanya untuk peranti berskala mikro. Ianya memanfaatkan sumber tenaga ambien untuk menghasilkan tenaga elektrik. Kajian yang mendalam telah dilakukan bagi memperoleh penuai tenaga dengan kecekapan dan kepekaan yang tinggi. Tiga sumber tenaga digunakan sebagai masukan iaitu tenaga haba, getaran dan Frekuensi Radio (RF). Masukan tenaga haba adalah dalam bentuk voltan DC manakala masukan getaran dan RF adalah dalam bentuk voltan AC. Kesemua masukan ini masing-masing ditetapkan pada nilai 0.02 V, 0.5 V dan -20 dBm. Frekuensi operasi yang digunakan bagi masukan getaran adalah 10 Hz manakala bagi masukan RF adalah 915 MHz. Litar penerus gelombang penuh digunakan bagi menukarkan isyarat getaran AC kepada DC. Sementara itu, litar pendarab voltan dibina dengan mengaplikasikan teknik modulasi substrat bagi menggandakan voltan masukan. Kesemua litar penuai tenaga tunggal ini digabungkan menggunakan litar penambah voltan untuk membentuk satu sistem penuai tenaga hibrid yang lengkap. Litar-litar penuai tenaga ini dibina dan disimulasi menggunakan perisian PSPICE dengan menyambungkan perintang beban 1 M $\Omega$ . Litar lengkap penuai tenaga dengan masukan hibrid berjaya mencapai voltan keluaran lebih kurang 2.12 V dan sesuai digunakan sebagai alternatif bekalan kuasa kepada aplikasi peranti bioperubatan. Peranti tersebut adalah Peranti Pemantau Kesihatan yang memerlukan bekalan masukan minimum 1.7 V.*

**Kata Kunci:** Penuai tenaga hibrid; Kecekapan; Kepekaan; Peranti berskala mikro

### ABSTRACT

*The deployment of energy harvester as a power supply attracts high attention especially for micro-scale devices. It is utilizing the ambient energy sources to produce electric energy. In-depth research has been carried out to achieve energy harvester with high efficiency and sensitivity. Three energy sources are used as input which are thermal energy, vibration and Radio Frequency (RF). The thermal energy input is in the form of DC voltage while RF and vibration is in the form of AC voltage. All these inputs are set to 0.02 V, 0.5 V and -20 dBm respectively. The operation frequency that has been used for vibration input is 10 Hz while for RF input is 915 MHz. The full-wave rectifier circuit is used to convert AC to DC vibration signal. Meanwhile, the voltage multiplier circuit is constructed by implementing substrate modulation techniques to multiply the input voltage. All these individual circuits are combined using the voltage adder circuit to form a complete hybrid energy harvester system. The energy harvester circuit is built and simulated using PSPICE software with the resistor load of 1 M $\Omega$ . The complete energy harvester circuit with hybrid input has successfully achieved output voltage approximately 2.12 V and suitable for use as an alternative power supply to biomedical device applications. The device is Health Monitoring device that requires minimum supply source of 1.7 V.*

**Keywords:** Hybrid energy harvester; Efficiency; Sensitivity; Micro-scale device

### PENGENALAN

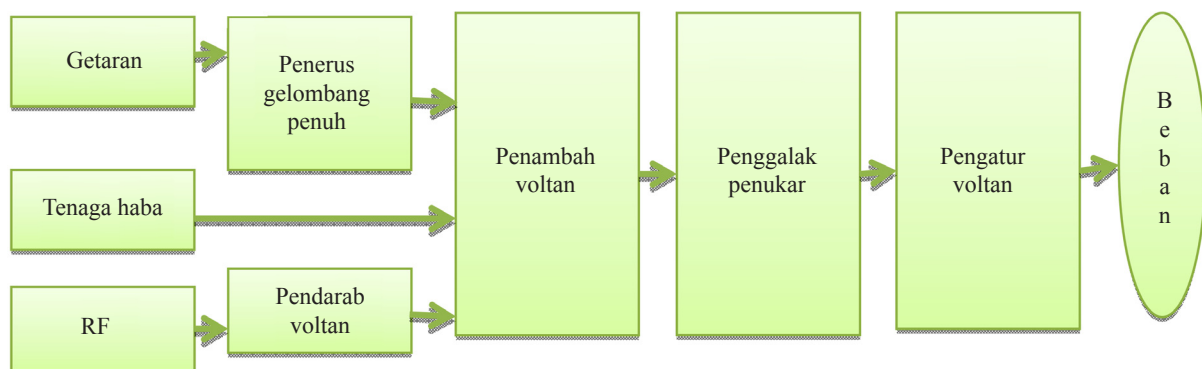
Permintaan ke atas peranti elektronik menjana kuasa sendiri semakin meningkat kebelakangan ini atas faktor kos yang rendah dan penyelenggaraan yang mudah. Antara sumber ambien yang berada di sekitar kita adalah tenaga haba, getaran, gelombang elektromagnet dan solar. Teknologi ini merupakan salah satu alternatif bagi menggantikan bateri terutamanya di kawasan luar bandar yang kadang kala memerlukan proses penyelenggaraan yang agak berisiko. Pembangunan sistem penuaian tenaga turut memberi sumbangan besar ke arah bidang bioperubatan dengan cara memanjangkan hayat bateri bagi peranti penerima pemantauan

kesihatan. Tiga jenis sumber tenaga masukan yang dipilih bagi sistem penuai tenaga yang dicadangkan ialah RF, haba dan getaran. Gabungan tiga sumber masukan diilhamkan untuk menyelesaikan masalah kuasa yang dihasilkan oleh sumber masukan tunggal. Selain itu, ia digunakan sebagai sokongan antara satu sama lain bagi memastikan sumber tenaga dibekalkan secara berterusan untuk mencapai operasi autonomi. Misalnya, jika salah satu sumber masukan tidak wujud terutamanya sumber haba kerana masukannya yang terlalu rendah, penuai tenaga RF dan getaran akan digunakan. Bagi ketiga-tiga penuai tenaga ini, kelebihan dilihat pada penuai tenaga RF kerana ia sentiasa wujud di mana-mana dan boleh didapati sama ada siang atau malam. Penuai tenaga RF

boleh ditakrifkan sebagai proses penyerapan tenaga daripada gelombang yang merambat di sekeliling kita dan ditukarkan kepada tenaga elektrik yang berguna tanpa memerlukan sebarang sumber kuasa luar (Semsudin et al. 2015). Dalam kajian ini, frekuensi operasi ditetapkan pada frekuensi ultra tinggi 915 MHz kerana isyarat RF lebih mudah merambat dengan jarak yang lebih jauh pada frekuensi ini. Kehilangan kuasa ketika perambatan juga adalah lebih rendah berbanding kehilangan kuasa pada jalur frekuensi yang lebih tinggi (Triet, Mayaram & Fiez 2008). Penuai tenaga haba merujuk kepada haba yang dikenakan ke atas dua logam berlainan. Perbezaan suhu antara dua logam tersebut akan menghasilkan voltan keupayaan di mana ia berkadar terus dengan nilai perbezaan suhu tersebut. Kesan ini dikenali sebagai kesan Seebeck yang telah ditemui oleh Seebeck pada tahun 1821. Arus elektrik akan mengalir berterusan dalam sesebuah litar apabila simpang-simpang pada litar tertutup yang terdiri daripada dua logam berlainan ini dikekalkan pada suhu berlainan (Jalil & Sampe 2013). Voltan yang terhasil agak rendah, iaitu hanya beberapa mV sahaja. Manakala penuai tenaga getaran pula dihasilkan daripada getaran sesuatu sistem sama ada mesin yang sedang beroperasi atau dari tindakan seseorang sama ada berjalan, berlari atau menepuk tangan. Terdapat tiga kaedah dalam penjanaan penuai tenaga getaran; piezoelektrik, elektrostatik dan elektromagnet.

Penyelidik Wang et al. (2011) dalam kajiannya telah menggunakan sel solar sebagai sokongan kepada tenaga haba. Kuasa yang disimpan dalam peranti simpanan ini digunakan untuk pemprosesan isyarat dan juga litar komunikasi tanpa wayar. Dalam satu kajian lain ada diketengahkan konsep penuaian hibrid masukan yang menggunakan dua sumber

tenaga; ambien cahaya dari lampu tiruan dan haba dari mesin untuk mengatasi kelemahan satu sumber tenaga bagi memanjangkan jangka hayat nod pengesan tanpa wayar (Yen & Sanjib 2011). Yonas et al. (2008) telah mencadangkan satu struktur mekanikal yang terdiri daripada dua mekanisme penuaian tenaga berbeza tetapi daripada sumber getaran yang sama, iaitu piezoelektrik dan elektromagnet. Selain itu, Nathaniel et al. (2009) telah mencadangkan untuk menggabungkan penuai tenaga dengan menggunakan suis elektronik atau pemultipleks. Apabila kedua-dua sumber tenaga wujud, hanya satu sumber sahaja yang akan dipilih untuk dituai dan ini akan ditentukan oleh litar pengurusan kuasa. Michelle et al. (2014) menggabungkan tiga sumber masukan haba, gerakan dan solar untuk memberikan kuasa yang sesuai bagi aplikasi peranti boleh pakai pada badan. Ketiga-tiga masukan akan disepadukan pada bekalan kuasa bersama-sama dengan *Asynchronous Finite State Machine* (AFSM) untuk menentukan sama ada tenaga dituai secara bersama atau individu. Salah satu cabaran yang dihadapi oleh sistem ini ialah terpaksa menampung sumber tenaga yang berbeza. Bilangan komponen yang diperlukan untuk sistem hendaklah dalam kuantiti yang sedikit walaupun sistem memerlukan penukar kuasa berganda. Ini merupakan cabaran utama untuk menghasilkan satu sistem penuai tenaga hibrid yang mempunyai kecekapan tinggi. Prestasi sesuatu sistem ditentukan oleh voltan keluaran, kecekapan dan kuasa masukan minimum yang diperlukan. Rajah 1 menunjukkan gambarajah blok asas sistem penuai tenaga hibrid yang menggabungkan ketiga-tiga masukan.



RAJAH 1. Blok asas penuai tenaga mikro hibrid

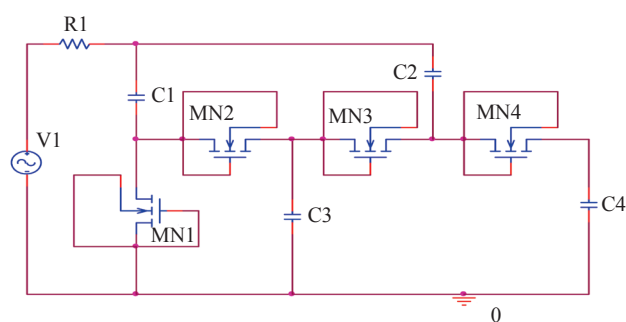
#### KAEDAH UJI KAJI

Terdapat beberapa litar yang diberi penekanan dan dibincangkan dalam bahagian ini. Litar tersebut adalah litar pendarab voltan dua peringkat, litar penerus gelombang penuh, litar penambah voltan, litar penggalak penukar dan litar pengatur yang masing-masing digunakan untuk masukan RF, masukan getaran dan menggabungkan kesemua masukan bagi menghasilkan sistem hibrid.

#### LITAR PENDARAB VOLTAN

Bagi sistem ini, dua peringkat litar pendarab voltan telah direka bagi menukarkan voltan masukan Arus Ulang Alik (AC) kepada Arus Terus (DC) dan seterusnya meningkatkannya ke tahap yang lebih tinggi. MOSFET telah berfungsi sebagai diod apabila kaki saliran dan get bersambung pada nod yang sama (Reddy 2011). MOSFET jenis *N* (NMOS) telah dipilih dan diubah suai bagi reka bentuk litar ini. Walau bagaimanapun,

masih terdapat kekangan kerana voltan ambang bagi MOSFET jenis ini masih terlalu besar berbanding dengan amplitud isyarat masukan (Sampe et al. 2016). Oleh itu, teknik modulasi substrat telah digunakan bagi menurunkan nilai voltan ambang,  $V_{th}$  seterusnya meningkatkan kecekapan litar. Parameter bagi MOSFET yang digunakan telah diprogramkan mengikut *Predictive Technology Model* (PTM) iaitu berdasarkan teknologi CMOS 0.13  $\mu\text{m}$ . Kelebihan diod berhubung transistor adalah kebocoran arusnya yang rendah. Struktur litar pendarab voltan telah dipertimbangkan bagi reka bentuk penukar Frekuensi Radio (RF) ke DC kerana ia berupaya menukarkan kedua-dua gelombang positif dan negatif isyarat masukan. Satu lagi kelebihan ialah ia boleh disusun secara berperingkat untuk menghasilkan keluaran yang tinggi. Bilangan peringkat pengganda voltan adalah penting kerana jika terlalu banyak peringkat, kesan parasit akan meningkat manakala sekiranya terlalu sedikit kemungkinan voltan yang dihasilkan tidak mencukupi (Zulkifli et al. 2015). Oleh itu, bilangan peringkat perlu dioptimumkan untuk mendapatkan prestasi litar terbaik.



RAJAH 2. Litar pendarab voltan

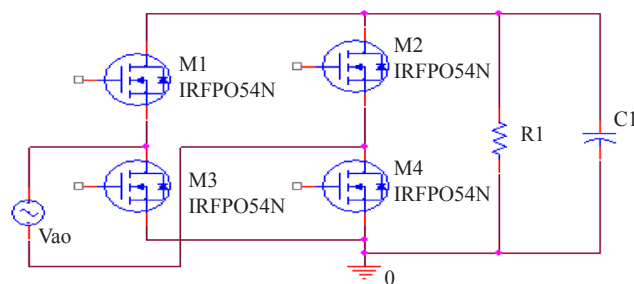
Rajah 2 menunjukkan litar pendarab voltan dua peringkat. Litar pendarab voltan dua peringkat ini telah direka dengan setiap peringkat menggunakan dua NMOS berhubung diod dan dua pemuat bernilai 10 pF. Nilai lebar dan panjang MOSFET telah ditetapkan dengan masing-masing bernilai 37.5  $\mu\text{m}$  and 130 nm. Dalam tempoh separuh kitaran negatif  $V_{masukan}$ , MOSFET  $MN_1$  dan  $MN_3$  adalah dalam keadaan ON manakala  $MN_2$  dan  $MN_4$  adalah OFF. Proses berlaku secara bertentangan bagi kitaran yang seterusnya.

#### LITAR PENERUS GELOMBANG PENUH

Litar penerus gelombang merupakan litar yang juga mempunyai fungsi yang sama dengan litar pendarab voltan, iaitu menukarkan isyarat AC kepada DC. Hal ini sangat penting kerana kebanyakan aplikasi menggunakan isyarat DC untuk berfungsi. Namun, perbezaan antara kedua-dua litar ini adalah dari segi voltan keluaran di mana voltan keluaran bagi litar penerus gelombang separuh adalah rendah berbanding dengan voltan masukan (Sampe et al. 2017). Terdapat tiga jenis penerus gelombang; penerus gelombang separuh, penerus gelombang penuh dan penerus gelombang

jejambat. Pada dasarnya, litar penerus gelombang sedia ada menggunakan diod Schottky dan pemuat untuk membetulkan voltan. Namun, diod tidak sesuai digunakan untuk penuai tenaga getaran ini kerana terdapat penurunan pada voltan hadapan serendah 0.1 V dan seterusnya mengurangkan kecekapan sistem tersebut. Bagi mengatasi isu ini, MOSFET yang mempunyai rintangan berterusan yang rendah dipilih untuk menggantikan diod.

Litar penerus gelombang yang digunakan memerlukan empat MOSFET, perintang sebagai beban dan pemuat yang berfungsi sebagai penapis untuk mendapatkan keluaran tulen tanpa riak. Pada separuh kitaran pertama, kekutuban punca voltan positif dan negatif masing-masing berada di kedudukan atas dan bawah. Rajah 3 menunjukkan hanya MOSFET M1 dan M4 beroperasi pada separuh kitar positif dengan menghasilkan bentuk gelombang sinus (Rao & Arnold 2011). Pada separuh kitaran negatif pula, arus akan mengalir pada kekutuban voltan yang terbalik dan menyebabkan M2 dan M3 berfungsi.



RAJAH 3. Litar penerus gelombang penuh

#### LITAR PENAMBAH VOLTAN

Kesemua masukan dihibridkan menggunakan komponen penguat kendalian (op-amp) yang terdiri daripada gabungan perintang dan transistor di atas satu cip silikon yang sama. Salah satu fungsi op-amp adalah untuk menjumlahkan atau menggandakan nilai voltan yang dibekalkan. Masukan sumber disambungkan pada masukan tak menyongsang (terminal positif) Op-Amp. Ini adalah untuk mendapatkan gelombang tidak songsang pada keluaran yang merintangi perintang.

#### LITAR PENGALAK PENUKAR

Keluaran dari op-amp akan menjadi masukan kepada litar penggalak penukar yang berfungsi untuk menaikkan nilai voltan yang rendah dengan menggunakan NMOS. Ia merupakan pensuisan pantas dan boleh beroperasi pada frekuensi yang agak tinggi (Sarker et al. 2015). MOSFET ini didorong oleh modulasi lebar denyut yang akan mengawal kitar tugas pensuisan bagi mendapatkan voltan keluaran yang tinggi. Selain daripada MOSFET, Scottky diode dan pearuh juga digunakan untuk mengelakkan kejatuhan voltan yang besar. Parameter pada modulasi lebar denyut (PWM) untuk mengawal kitar tugas juga memainkan peranan yang

penting bagi peningkatan voltan. Litar penggalak penukar terbahagi kepada dua mod; mod pengaliran berterusan dan mod pengaliran tidak berterusan. Pada keseluruhan kitaran pensuisan dalam mod pengaliran berterusan, arus pearuh mengalir secara berterusan dan tidak mencapai sifar. Manakala untuk mod pengaliran tidak berterusan pula, arus pearuh adalah sifar untuk sebahagian daripada kitaran pensuisan.

#### LITAR PENGATUR VOLTAN

Voltan keluaran daripada litar penggalak penukar adalah tidak stabil dan berkemungkinan terlalu tinggi untuk disambungkan terus pada beban. Untuk itu, litar pengatur voltan digunakan untuk mengawal dan menstabilkan voltan keluaran. Kejatuhan voltan di antara masukan dan keluaran dikawal oleh transistor simpang dwikutub (BJT) yang beroperasi dengan berkesan pada kelajuan sederhana tinggi untuk voltan, arus serta kuasa elektrik yang rendah. Beban rintangan 1 M $\Omega$  dipilih mewakili aplikasi bioperubatan dan disambungkan pada terminal pemancar BJT.

#### LITAR PENUAI TENAGA HIBRID

Kesemua litar individu tersebut telah digabungkan menjadi satu sistem lengkap hibrid menggunakan ketiga-tiga masukan; RF, tenaga haba dan getaran seperti yang ditunjukkan pada Rajah 4. Ujian simulasi dijalankan untuk litar ini untuk melihat kecekapan sistem berdasarkan keluaran voltan. Kerja eksperimen dipanjangkan lagi kepada peringkat perkakasan papan reka untuk menguji sistem hibrid dari masukan haba dan getaran. Ujian pada perkakasan papan reka ini hanya untuk litar hibrid haba dan getaran sahaja kerana MOSFET yang digunakan untuk membina litar pendarab voltan 2

peringkat perlu melalui proses yang berbeza, iaitu fabrikasi cip disebabkan komponen yang digunakan tiada di pasaran. Litar penuai RF tersebut hanya diuji pada peringkat susun atur litar bersepadu sahaja bagi memastikan litar yang direka dan disimulasi boleh difabrikasikan pada masa akan datang.

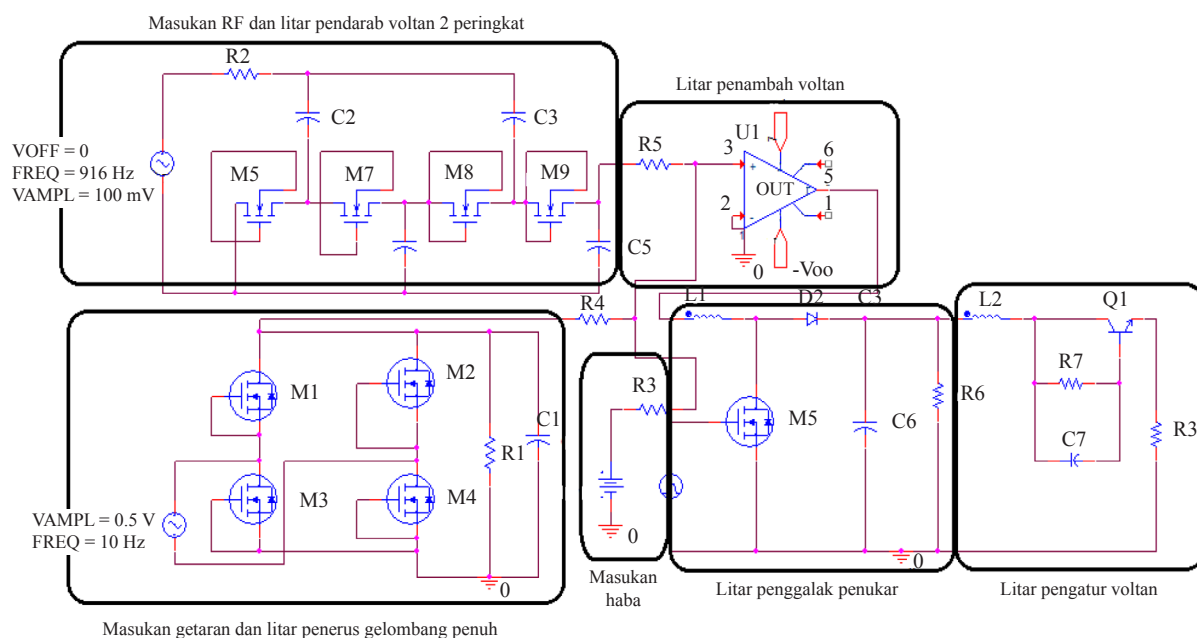
#### KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

##### HASIL SIMULASI LITAR PENDARAB VOLTAN 2 PERINGKAT

Rajah 5 menunjukkan keputusan simulasi bagi masukan RF dalam bentuk AC sebanyak 32 mV yang telah ditukarkan menjadi voltan DC dan dipertingkatkan menjadi 110 mV dalam masa 40  $\mu$ s. Dengan kombinasi litar penerus dan pemuat, voltan puncak masukan dapat digandakan untuk menghasilkan keluaran DC yang lebih besar.

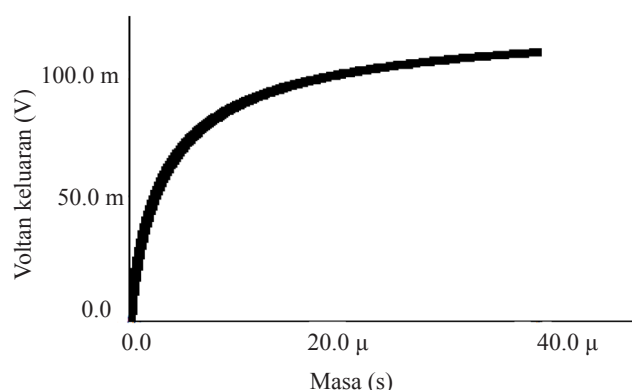
##### HASIL SIMULASI LITAR HIBRID MASUKAN HABA DAN GETARAN

Simulasi untuk litar hibrid masukan haba dan getaran diuji dan dibandingkan dengan perkakasan papan reka. Rajah 6 menunjukkan keputusan simulasi bagi voltan keluaran yang diuji pada litar penerus gelombang penuh, penggalak penukar dan pengatur voltan yang menghubungkan beban. Isyarat masukan getaran AC (0.5 V) diperbetulkan untuk mendapatkan isyarat DC (0.25 V). Isyarat keluaran yang terhasil ini adalah separuh daripada isyarat masukan yang dibekalkan. Hasil ini adalah lebih baik daripada litar penerus gelombang penuh yang menggunakan diod. Kelemahan utama diod adalah berlakunya kejatuhan voltan ambang yang akan merendahkan lagi voltan keluaran. Graf ini juga menunjukkan voltan keluaran bagi penggalak penukar dan pengatur voltan yang berkadar terus dengan masa. Voltan

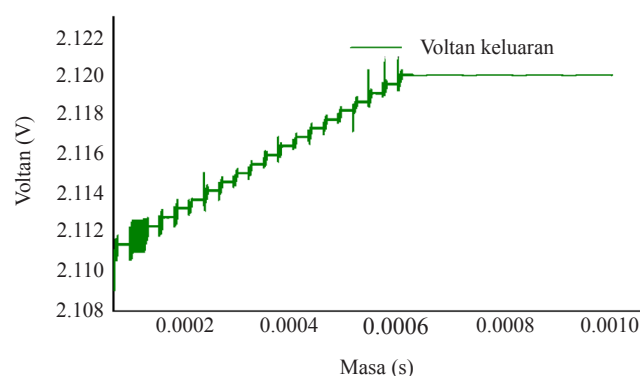


RAJAH 4. Litar lengkap penuai tenaga hibrid

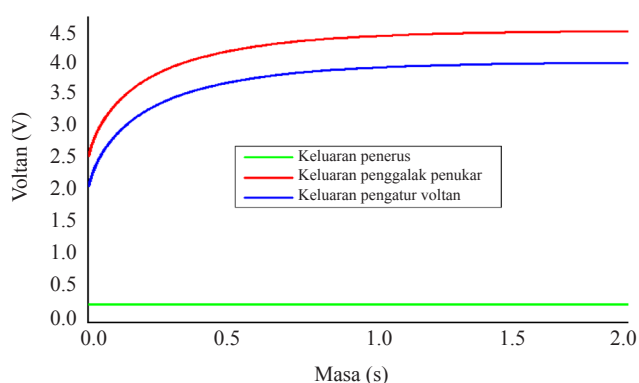




RAJAH 5. Voltan keluaran untuk simulasi bagi masukan RF



RAJAH 7. Voltan keluaran litar penuai tenaga hibrid RF, haba dan getaran



RAJAH 6. Voltan keluaran untuk simulasi bagi masukan hibrid haba dan getaran

keluaran yang dicatatkan adalah 4.5 V dan 4.0 V masing-masing untuk penggalak penukar dan pengatur voltan.

#### HASIL SIMULASI LITAR PENUAI TENAGA HIBRID LENGKAP

Voltan masukan yang rendah dari setiap satu litar individu tidak menjadi isu besar dalam kajian ini kerana masukan-masukan tersebut telah dihibridkan bersama untuk menghasilkan keluaran yang lebih stabil dan tinggi. Hasil simulasi diuji selama 1 ms dan voltan adalah berkadar terus dengan masa. Voltan meningkat dari masa 0 s dan menjadi malar bermula pada masa 0.6 ms dengan hasil yang diperoleh adalah sebanyak 2.12 V seperti yang ditunjukkan pada Rajah 7.

#### HASIL PERKAKASAN PAPAN REKA LITAR HIBRID MASUKAN HABA DAN GETARAN

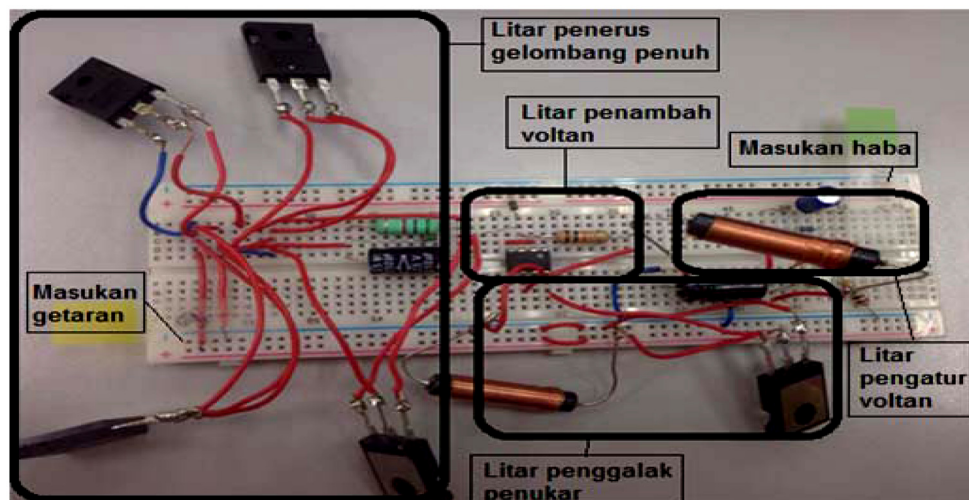
Simulasi yang dilakukan diteruskan lagi kepada peringkat seterusnya, iaitu peringkat perkakasan papan reka untuk menguji fungsi sistem pada masa nyata. Rajah 8(a) menunjukkan hasil pada perkakasan papan reka manakala Rajah 8(b) pula menunjukkan perkakasan papan reka yang diuji dengan menggunakan voltmeter. Voltan keluaran yang terhasil adalah 3.94 V dan nilai ini lebih rendah sedikit daripada hasil simulasi disebabkan oleh kehilangan kuasa yang berlaku semasa uji kaji dijalankan.

#### HASIL IMPLEMENTASI LITAR PENDARAB VOLTAN DALAM BENTUK LITAR BERSEPADU

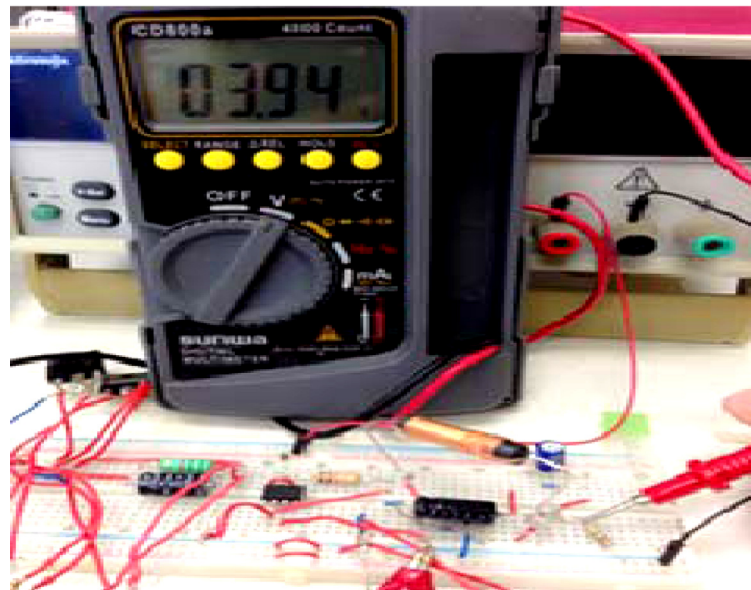
Teknik litar pendarab voltan yang direka telah diteruskan dengan proses implementasi atas cip menggunakan proses teknologi CMOS 0.13  $\mu\text{m}$  Silterra. Proses ini diperlukan bagi memastikan teknik modulasi substrat yang dibina melepasi kriteria untuk difabrikasi. Rajah 9(a) menunjukkan gambaran susun atur litar bagi satu peringkat litar pendarab voltan. Litar bersepadu tersebut telah diuji menerusi *Design Rules Check* (DRC) dan *Layout Versus Schematic* (LVS). Hasil pemeriksaan membuktikan litar tersebut bebas dari sebarang kesalahan dari segi saiz, dimensi mahupun jarak geometri. Ia membuktikan bahawa tidak terdapat sebarang perbezaan antara susun atur litar dalam skematik dan litar bersepadu yang dibina. Bagi susun atur tersebut pemuat fm5m1 telah dipilih dengan parameter *sp\_length* bernilai 2.502 m yang mewakili nilai kapasitan 1.608 pF. Untuk mewakili satu pemuat bernilai 10 pF, sebanyak 6 bentuk fm5m1 digunakan. Sementara itu bagi MOSFET, *nm\_hp* telah dipilih daripada perpustakaan "Sil013 standard cells." Rajah 9(b) menunjukkan lapisan dinding yang diperlukan bagi modulasi substrat.

#### PERBINCANGAN

Sistem penuai tenaga mendapat perhatian tinggi sejak kebelakangan ini kerana berupaya untuk menuai tenaga ambien dari persekitaran dan ditukarkan kepada tenaga yang sangat berguna. Oleh itu, sistem ini telah dicadangkan bagi memperbaiki sistem sedia ada dari segi kecekapan dan kepekaannya. Hasil gabungan ketiga-tiga litar dengan sumber yang berbeza adalah bagi memastikan kelangsungan operasi sesuatu sistem tanpa sebarang gangguan. Bagi litar penuai RF, pelaksanaan teknik modulasi substrat dalam litar ini benar-benar menyumbang kepada aplikasi penuai kuasa yang rendah kerana ia berjaya mengurangkan voltan ambang. Seterusnya, bilangan peringkat dalam litar tersebut turut memberi kesan yang besar ke atas keluaran DC. Ini kerana keluaran adalah berkadar terus dengan bilangan peringkat. Keluaran yang lebih tinggi ini menjadi penyokong kepada masukan DC yang lain. Untuk masukan getaran pula, penggunaan MOSFET



RAJAH 8(a). Perkakasan papan reka untuk hibrid haba dan getaran

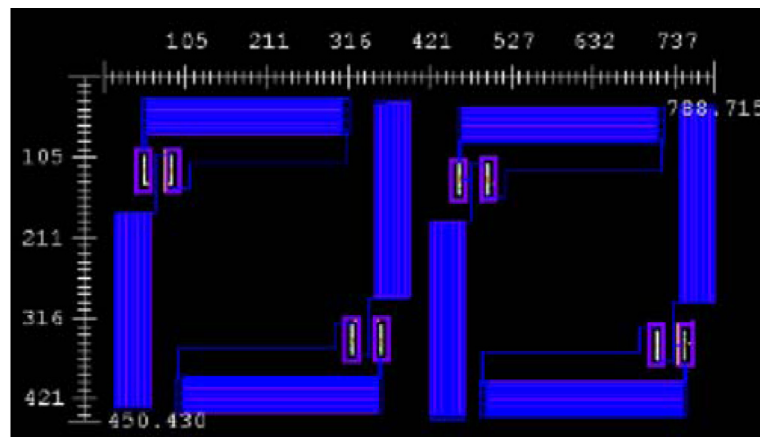


RAJAH 8(b). Hasil litar penuai tenaga hibrid haba dan getaran yang diuji dengan voltmeter

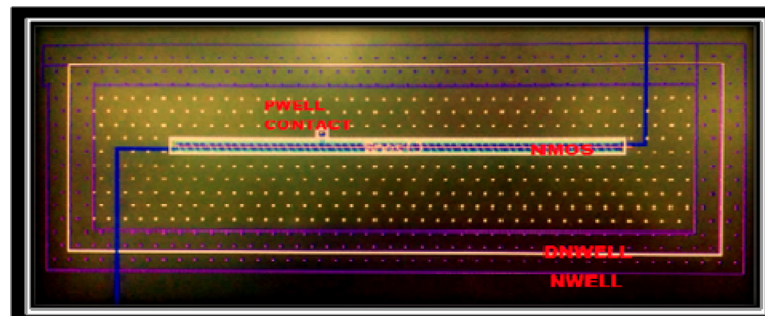
menggantikan diod merupakan alternatif bagi mengelakkan kejatuhan voltan ambang dan seterusnya akan merendahkan lagi nilai voltan yang terhasil. Litar penambah voltan telah berfungsi dengan baik bagi menggabungkan masukan yang lebih daripada satu. Hasil daripada penambah voltan masih lagi rendah dan perlu dinaikkan melalui litar penggalk penukar untuk mencapai voltan keluaran yang diinginkan. Faktor utama yang menyumbang kepada peningkatan voltan dalam litar ini adalah dengan mengubah nilai awal ( $V_1$ ), nilai denyut ( $V_2$ ), masa lengah ( $T_D$ ), masa naik ( $T_R$ ), masa jatuh ( $T_F$ ), lebar denyut ( $PW$ ) dan tempoh ( $PER$ ) yang terdapat pada PWM. Litar pengatur voltan di akhir sistem juga berfungsi dengan baik untuk mengawal voltan keluaran yang terhasil supaya tidak melebihi sasaran bagi peranti elektronik berkuasa rendah.

#### KESIMPULAN

Kajian ini berjaya menghasilkan satu sistem Penuai Tenaga yang dapat menghasilkan voltan keluaran sebanyak 2.12 V dari tiga sumber masukan ambien iaitu getaran, haba dan RF. Litar Penuai Tenaga ini dapat membekalkan tenaga elektrik dan menjadi sumber tenaga alternatif kepada sumber yang sedia ada. Dengan menggabungkan litar penerus gelombang penuh, litar pendarab voltan dua peringkat, litar penuai getaran serta litar penambah voltan kesemua sumber ambien di sekitar kita dapat dimanfaatkan. Sistem ini mampu diaplikasikan di dalam peranti mikro terutamanya untuk kegunaan bio perubatan. Penyelidikan ini mensasarkan peranti Pemantau kesihatan contohnya *Pulse Oximeter and Heart Rate Sensor* yang memerlukan bekalan voltan minimum sebanyak 1.7 V.



RAJAH 9(a). Hasil susun atur litar bersepadu pendarab voltan dalam perisian Mentor Grafik



RAJAH 9(b). Susun atur MOSFET dengan modulasi substrat

#### PENGHARGAAN

Kajian ini telah mendapat sumbangan dari Kementerian Pendidikan di bawah geran FRGS 2/2014/TK03/UKM/02/1 dan dana penyelidikan universiti GUP-2015-021.

#### RUJUKAN

- Jalil, M.I.A and Sampe, J. 2013. Experimental investigation of thermoelectric generator modules with different technique of cooling system. *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 6(1): 1-7.
- Mansano, A., Bagga, S. and Serdijn, W. 2013. A high efficiency orthogonally switching passive charge pump rectifier for energy harvesters. *IEEE Trans. Circ. Syst. I: Regular Paper* 60: 1959-1966.
- Michelle, S.M.L, Sawal, H.M.A, Sampe, J. and Islam, M.S. 2014. Modelling of hybrid energy harvester with DC-DC boost converter using arbitrary input sources for ultra-low-power micro-devices. *IEEE-ICSE2014 Proc.* 28-31.
- Nathaniel, J. G., Travis, J. K., Albert, C., Diego, R. Y. and Rajeevan, A. 2009. Integrated solar energy harvesting and storage," *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst.* 17(5): 627-637.
- Nintanavongsa, P., Muncuk, U., Lewis, D.R. and Chowdhury, K.R. 2012. Design optimization and implementation for RF energy harvesting circuits. *IEEE J. Emerg. Select. Top. Circ. Syst.* 2: 24-33.
- Rao, Y. and Arnold, D.P. 2011. An Input-powered vibrational energy harvesting interface circuit with zero standby power. *IEEE Transactions on Power Electronics* 26 (12): 3524-33.
- Reddy, D. 2011. "New Architecture Development for Energy Harvesting." M.Sc. Thesis, Texas Tech University, Texas, USA.
- Sampe, J., Semsudin, N.A.A., Zulkifli, F.F., Islam, M.S. and Ab. Razak, M.Z. 2017. Hybrid energy harvester based on radio frequency, thermal and vibration inputs for biomedical devices. *Asian J. Sci. Res.* 10(2): 79-87.
- Sampe, J., Zulkifli, F.F., Semsudin, N.A.A. and Majlis, B.Y. 2016. Ultra low power hybrid micro energy harvester using rf, thermal and vibration for biomedical devices. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences* 8: 6-9.
- Sarker, M.R., Mohamed, A. and Mohamed, R. 2015. Performance evaluation and comparison of developed ulp energy harvester in active technique with conventional circuits in passive technique. *Int. J. Renew. Energy Environ. Eng.* 3: 124-129.

- Semsudin, N.A.N, Sampe, J., Islam, M.I. and Md. Zain, A.R. 2015. Architecture of ultra-low-power micro energy harvester using hybrid input for biomedical devices. *Asian J. Sci. Res.* 8(2): 212-224.
- Shi, C., Miller, B., Mayaram, K. and Fiez, T. 2011. A multiple-input boost converter for low-power energy harvesting. *IEEE Trans. Circ. Sys. II: Express Briefs* 58: 827-831.
- Triet, L., Mayaram, K. and Fiez, T. 2008. Efficient far-field radio frequency energy harvesting for passively powered sensor networks. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 43(5): 1287-1302.
- Yonas, T., Shujun, Z. and Shashak, P. 2008. Multimodal energy harvesting system: piezoelectric and electromagnetic. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 20(5): 625-632.
- Zulkifli, F.F., Sampe, J. Islam, M.S. and Mohamed, M.A. 2015. Architecture of ultra low power micro energy harvester using RF Signal for health care monitoring system: A review. *American Journal of Applied Sciences* 12(5): 335-44.
- Zulkifli, F.F., Sampe, J., Islam, M.S., Md. Ambri M. and Shafii A.W. 2015. Optimization of RF- DC converter in micro energy harvester using voltage boosting network and bulk modulation technique for biomedical devices. *RSM2015 Proc.*, K. Terengganu, Malaysia, 8-11.
- Jahariah Sampe\*, Nor Afidatul Asni Semsudin, Farah Fatin Zulkifli & Burhanuddin Yeop Majlis  
Micro and Nano Electronics System Lab  
Institute Microengineering & Nanoelectronics (IMEN)  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600 UKM Bangi, Malaysia  
Phone: + 603-89118156
- \*Corresponding author; email: jahariah@ukm.edu.my
- Received date : 6<sup>th</sup> June 2017  
Accepted date : 21<sup>st</sup> September 2017  
In Press date : 16<sup>th</sup> October 2017  
Published date : 30<sup>th</sup> October 2017